

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК

Даниленко И.А.^{1,2}, Петрова Е.В.¹, Яковлев Г.А.¹, Гроховский В.И.¹

¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, evgeniya.petrova@urfu.ru

²Институт геологии и геохимии им А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, ira.dnl2014@gmail.com

В процессе формирования структуры вещество метеоритов испытывает воздействия различных давления и температуры. Обыкновенные хондриты представляют собой вещество, претерпевшее несколько процессов: аккрецию из газопылевого облака, термический метаморфизм в родительских телах метеоритов и, в большинстве случаев, ударный метаморфизм. Значительный вклад в метаморфизм примитивного вещества вносят температурные воздействия.

Исследование химического состава и структуры минералов, слагающих метеориты, позволяют определять термическую историю вещества. В настоящем исследовании выполнены эксперименты по термическому воздействию на вещество метеоритов и последующий анализ влияния на структуру известного приложенного воздействия. В качестве материала для данного исследования было выбрано вещество обыкновенного хондрита Челябинск LL5.

Метеоритный дождь Челябинск выпал 15 февраля 2013 года и множество его фрагментов было собрано метеоритной экспедицией УрФУ практически сразу после падения. Вещество метеорита было классифицировано как обыкновенный хондрит группы LL, петрологического типа 5, степень ударного метаморфизма 4, земного выветривания – 0 (LL5 S3/4 W0) [Ruzicka et al., 2015]. Особенности структуры вещества, присутствие различных литологий в составе фрагментов метеорита было подробно описано ранее в [Porova et al., 2013; Galimov et al., 2013; Kohout et al., 2014; Badyukov et al., 2015; Reigher et al., 2015]. Особенность брекчии хондрита Челябинск в том, что светлая и темная литологии данного обыкновенного хондрита имеют практически одинаковый

химический состав, соответствующий хондриту LL5 типа [Galimov et al., 2013]. Вместе с тем, отмечаются некоторые отличия в структуре (текстуре) вещества светлой и темной литологий.

Таким образом, результаты лабораторных экспериментальных воздействий на вещество светлой литологии можно сравнивать со структурой других литологий данной брекчии. Полученные данные могут помочь в поиске возможных объяснений того, в результате каких процессов из вещества светлой литологии может быть сформирована темная литология.

Для проведения эксперимента от образца светлой литологии метеорита Челябинск были отпилены 5 фрагментов с помощью пилы Buehler IsoMet с водяным охлаждением и последующей сушкой феном. Идентификация структурных признаков исследуемых фрагментов проводилась с помощью оптического инвертированного микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT с регистрацией изображений системой AxioVision, а также электронного микроскопа FE-SEM ΣIGMA VP. Образцы светлой литологии метеорита Челябинск LL5 (рис. 1) были подвергнуты тепловому воздействию до температур 700, 900, 1100, 1300 и 1500 °С. Эксперимент осуществлялся в вакуумной электропечи СНВЭ-9/18 при давлении 10-2 Па. До 70 °С нагрев осуществлялся со скоростью 700 °С/час, до 900 °С со скоростью 2000 °С/час, до 1100 °С со скоростью 1200 °С/час, до 1300 °С со скоростью 600 °С/час, до 1500 °С со скоростью 300 °С/час. Охлаждение образцов осуществлялось в печи от 1500 °С до 1300 °С со скоростью 600 °С/час, от 1300 °С до 1100 °С со скоростью 1200 °С/час от 1100 °С до 900 °С со скоростью 2000 °С/час, далее до комнатной температуры 20 °С охлаждение протекало со скоростью 5 °С/мин. Образцы, нагретые до температур 1100 °С, 1300 °С, 1500 °С выдерживались при данных температурах 15 минут, а образцы, нагретые до температур 700 °С и 900 °С выдерживались 30 минут. Для исследования микроструктуры на образцах были подготовлены шлифы по стандартной методике.

Исходная структура образцов метеорита Челябинск LL5 со светлой литологией представлена хондритовой структурой, которая сложена группами силикатных минералов оливина $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$, пирок-



Рис. 1. Образцы светлой литологии метеорита Челябинск LL5, подготовленные для проведения термического эксперимента



Рис. 2. Фрагменты метеорита Челябинск LL5, исходно имевшие светлую литологию, после термического воздействия: а – нагрев до температуры 1100 °С; б – нагрев до температуры 1300 °С

сена (Fe,Mg)SiO₃, плагиоклаза. В силикатной матрице присутствуют в основном отдельные зерна металла Fe(Ni,Co), троилита FeS и их сростаний.

На рисунке 2 представлены фрагменты метеорита Челябинск LL5 после термического воздействия, исходно представлявшие собой образцы светлой литологии. Образец нагретый до температуры 1100 °С приобрел внешнее сходство с темной литологией метеорита Челябинск LL5 (рис. 2, а). При визуальном осмотре образца, нагретого до температуры 1300 °С, видно, что данный образец приобрел внешнее сходство с литологией ударного расплава метеорита Челябинск LL5 (рис. 2, б). При этом полагается [Galimov et al., 2013; Badyukov et al., 2015], что темная литология и литология ударного расплава метеорита Челябинск образована в результате нагрева в естественных условиях от ударного события в космосе.

Изучение микроструктуры образца светлой литологии после термического воздействия (1100 °С, 1300 °С) выявило плавление фаз металла Fe(Ni, Co) и троилита FeS, с последующей кристаллизацией на поверхности образца. Для образца, нагретого до 1300 °С, наблюдалось частичное изменение формы образца.

Нагрев до температуры 1500 °С вызвал массивное плавление образца. При этом фрагмент полностью утратил свою форму. Изучение топографии образца во вторичных электронах демонстрирует течение расплава и его медленную кристаллизацию с ростом крупных хрупких параллельных кристаллов (рис. 3). Следует отметить, что преобразованный от температурного воздействия образец отличается от структуры литологии ударного расплава как по внешним характеристикам (цвет), так и по форме и размеру кристаллов в структуре.

Таким образом, в результате нагревательных экспериментов с веществом светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск LL5 показано, как преобразуется структура вещества при воздействии различных температур. В работе выполнено сравнение особенностей структуры образцов свет-

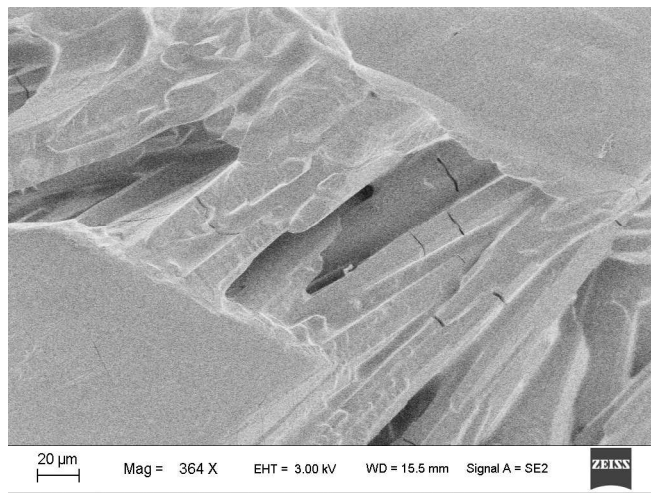


Рис. 3. Изображение во вторичных электронах фрагмента метеорита Челябинск LL5, испытавшего тепловое воздействие 1500 °С

лой литологии хондрита Челябинск, подвергнутых нагреву до различных температур и образцов вещества хондритной брекчии Челябинск разных литологий, различимых невооруженным глазом (светлая, темная, ударный расплав). Показано, что экспериментально нагретые фрагменты светлой литологии имеют как сходства, так и различия с образцами темной литологии и ударного расплава метеорита Челябинск LL5, испытавшими нагрев в естественных условиях при ударном событии в космосе. Показано, что на формирование литологий оказало влияние не только температурное воздействие, но и ударное преобразование, как это было исследовано в [Petrova et al., 2018, Петрова и др., 2019]. При этом, в результате нагревательных экспериментов получены структуры, которые еще не были обнаружены в изученных образцах метеоритного дожда Челябинск.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проекты 5.4825.2017/6.7, 5.3451.2017/4.6), а также Акта 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрова Е.В., Гроховский В.И., Кохоут Т., Муфтахетдинова Р.Ф., Яковлев Г.А. Метеорит Челябинск после ударно-волнового эксперимента // Геохимия. 2019. №8 (в печати).
2. Badyukov D.D., Raitala J., Kostama P., Ignatiev A.V. Chelyabinsk meteorite: Shock metamorphism, black veins and impact melt dikes, and the Hugoniot // Petrology. 2015. Vol. 23, No. 2, pp. 103-115.

3. Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alexeev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevast'yanov V.S. Analytical results for the material of the Chelyabinsk meteorite // *Geochemistry International*. 2013. Vol. 51, pp. 522-539.
4. Kohout T., Gritsevich M., Grokhovsky V.I., Yakovlev G.A., Haloda J., Halodova P., Michallik R.M., Penttilä A. and Muinonen K. Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite – insight into shock induced changes in asteroid regoliths // *Icarus*. 2014. Vol. 228, pp. 78-85.
5. Petrova E.V., Kohout T., Grokhovsky V.I. Spherical shock experiments with Chelyabinsk meteorite: characterization of shock gradient by optical and electron microscopy // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2015. Vol. 53, SI, A245.
6. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Yu., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Yu., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. Ik, Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. Vol. 342, P. 1069.
7. Righter K., Abell P., Agresti D., Berger E.L., Burton A.S., Delaney J.S., Fries M.D., Gibson E.K., Haba M.K., Harrington R., Herzog G.F., Keller L.P., Locke D., Lindsay F.N., McCoy T.J., Morris R.V., Nagao K., Nakamura-Messenger K., Niles P.B., Nyquist L.E., Park J., Peng Z.X., Shih C.-Y., Simon J.I., Swisher III C.C., Tappa M.J., Turrin B.D., and Zeigler R.A. Mineralogy, petrology, chronology, and exposure history of the Chelyabinsk meteorite and parent body. // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2015. Vol. 50, No 10, pp. 1790-1819.
8. Ruzicka A., Grossman J., Bouvier A., Herd C.D.K. and Agee C.B. // *The Meteoritical Bulletin*. 2015. No. 102 pp. 8-9.